

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190060

## 高强度螺纹钢铸坯表面裂纹原因分析及控制

黄 雁, 王东兴, 陈永峰, 杨伟勇, 张 强, 王吾磊  
(芜湖新兴铸管有限责任公司, 安徽 芜湖 241000)

**摘 要:**对采用转炉-精炼-连铸(全水型连铸机)工艺路线生产出的高强度螺纹HRB600(E)钢铸坯角部横裂纹进行了研究。结果表明:HRB600(E)铸坯角部横裂纹形成于结晶器。研究认为采用弱冷方式、控制浇铸速度、选用合理保护渣、合理二冷分配比等方式可有效解决铸坯角部横裂纹。工艺优化后铸坯角部横裂纹基本消除,且轧材无翘皮、结疤等质量缺陷。

**关键词:**高强度螺纹钢;HRB600(E);角部横裂纹

**文献标志码:**A    **文章编号:**1005-4006(2020)01-0040-06

## Analysis and control of surface crack in high strength thread steel

HUANG Yan, WANG Dong-xing, CHEN Yong-feng, YANG Wei-yong,  
ZHANG Qiang, WANG Wu-lei  
(Wuhu Xinxing Casting Pipe Co., Ltd., Wuhu 241000, Anhui, China)

**Abstract:** Corner transverse cracks of HRB600 (E) steel slab with high strength threads produced by converter-refining-continuous casting (full water continuous casting machine) process are studied. The results show that the transverse corner cracks of HRB600 (E) billet are formed in the mould. It is concluded that the transverse corner cracks can be effectively solved by means of weak cooling, controlling casting speed, selecting reasonable flux and rational secondary cooling distribution ratio. After optimizing the process, the transverse corner cracks of the billet are basically eliminated, and there are no quality defects such as warping and scarring in the rolled products.

**Key words:** high strength thread steel; HRB600(E); corner transverse crack

在国家大力提倡节能减排、绿色环保的时代背景下,普通强度钢筋(不高于400 MPa级钢筋)作为土木工程建设用钢主材的状况已无法满足发展的需要。同时在“十二五”发展规划中已明确提出要“适应减量化用钢趋势,升级热轧螺纹钢标准,重点发展400 MPa级及以上高强度抗震螺纹钢”。

### 1 表面裂纹缺陷特征及成因分析

中国某钢厂为实现高效化、低成本化,采用转

炉—精炼—连铸(全水连铸机)工艺路线生产高强度螺纹HRB600(E)钢,铸坯表面出现批量的角部横裂纹,同时轧材伴有翘皮、结疤等质量缺陷,严重影响HRB600(E)钢产品的质量和生产成本。其中该钢种生产连铸主要技术参数如表1所示。

#### 1.1 缺陷特征

##### 1.1.1 宏观特征

在实际生产中发现,裂纹通常隐藏于铸坯内弧氧化皮而无法直接观察到。随机锯切长度500 mm

表1 连铸主要技术参数

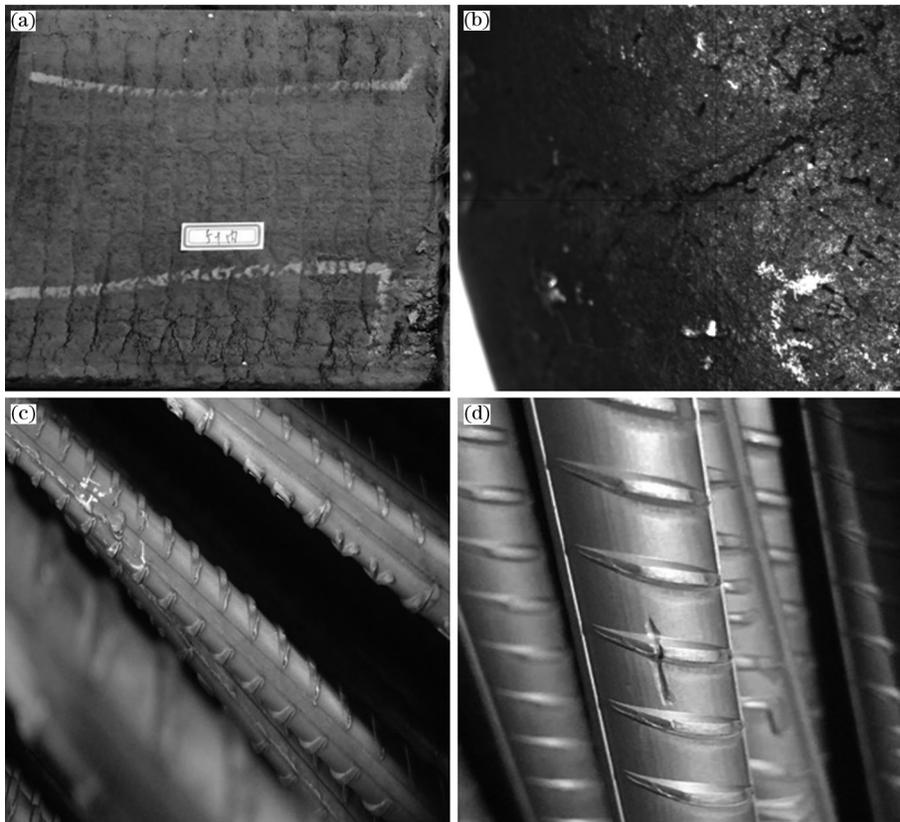
Table 1 Main technical parameters of continuous casting

流数	弧型半径/ mm	浇铸断面/ (mm×mm)	拉速/ (m·min <sup>-1</sup> )	冶金长度/ m	二冷冷却 长度/m	二冷比水量/ (L·kg <sup>-1</sup> )	结晶器水量/ (L·min <sup>-1</sup> )	二冷水 分配比
10	9 000	180×180	1.8~2.4	27	6.3	1.3	2 500	26:48:17:9

HRB600(E)钢铸坯进行表面酸洗,并用钢丝刷清洗铸坯表面,发现在铸坯内弧角部有大量的横向裂纹,

垂直于浇铸方向,如图1(a)所示。进一步将铸坯裂纹放在体式显微镜下观察,裂纹主要集中在内弧面振痕

波谷处,如图1(b)所示。与之对应的轧材的缺陷主要为翘皮、结疤、暗线裂纹,如图1(c)、(d)所示。



(a) 腐蚀后铸坯内弧表面; (b) 体式显微镜下裂纹形貌; (c) 轧材翘皮缺陷形貌; (d) 轧材裂纹缺陷形貌。

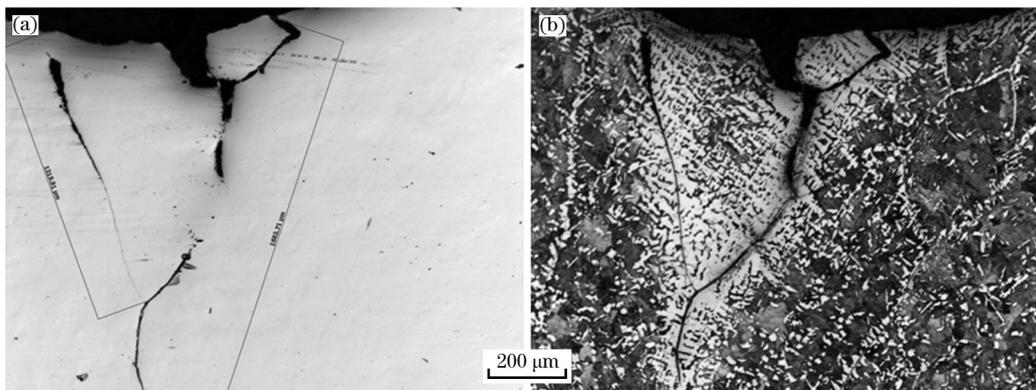
图1 铸坯裂纹宏观形貌

Fig.1 Macro-morphology of slab cracks

### 1.1.2 微观特征

取铸坯裂纹试样观察(放大50倍),发现裂纹大多沿铸坯振痕波谷处开裂,裂纹深度约2~3 mm,如

图2(a)所示。裂纹腐蚀后观察,裂纹大多数为沿晶开裂,在裂纹的周围大多数有明显的脱碳,如图2(b)所示,由此说明铸坯表面裂纹形成于结晶器内。



(a) 裂纹开口处形貌; (b) 裂纹试样显微组织。

图2 裂纹微观特征

Fig.2 Micro-characteristics of cracks

## 1.2 形成机制探讨

该钢厂采用铌、钒复合微合金化生产HRB600(E)

钢筋,铌、钒元素可用于调节变形奥氏体的再结晶行为和阻止晶粒长大,间接起到细化晶粒的作用并

对钢产生沉淀强化,从而提高钢材的强度和韧性。但是若控制不好,AIN和(Nb、Ti、V)的碳氮化物大量在晶界析出,会促使钢的塑性降低,产生表面横裂纹。

文献[1]指出含Al、Nb、V钢铸坯表面易产生细小的横裂纹,在弯曲或矫直中传播长大成较大的横裂纹,振痕的谷底槽口在弯曲或矫直点易诱发裂纹。

## 2 连铸坯表面裂纹的控制策略及效果

基于上述表面裂纹产生机制,本研究解决铸坯表面角部横裂纹的策略主要有以下几部分。

### 2.1 成分控制

由于钢中的N与Nb、V、Al结合形成氮化物,在晶界析出后,形成晶界断裂,因此钢中N含量控制应引起重视,较高的氮含量容易造成铸坯裂纹发生。通过优化钒氮合金与钒铁合金配比加入量,确保成品氮含量控制120~130 ppm,如表2所示。

表2 优化前后不同合金配比加入量

Table 2 Addition of different alloys before and after optimization

钢种	类别	合金加入量(kg·t <sup>-1</sup> )		成品氮质量分数/10 <sup>-6</sup>
		钒氮合金	钒铁合金	
HRB600(E)	优化前	1.05	0.93	150~160
	优化后	0.85	1.25	120~130

表3 优化前后结晶器水流速对比

Table 3 Contrast of mold water velocity before and after optimizing

类别	拉速/ (m·min <sup>-1</sup> )	水缝 宽度/m	结晶器 周边长/m	结晶器进 回水温差/℃	结晶器水量/ (L·min <sup>-1</sup> )	水流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	坯壳厚度/ mm
优化前	2	0.004	0.732	6.5	2 500	13.9	16.3
优化后	2	0.004	0.732	7.2	2 000	11.2	15.3

表4 不同结晶器水量裂纹程度对比

Table 4 Contrast of crack degree in different water quantity of crystallizer

钢种	结晶器水量/ (L·min <sup>-1</sup> )	铸坯检验 数量/块	裂纹 程度
HRB600(E)	2 500	5	严重
	2 000	5	较为严重

### 2.2.2 保护渣理化性能指标优化

文献资料[4]表明保护渣的碱度控制铸坯在结

### 2.2 结晶器内传热控制

按照上文分析,铸坯裂纹主要形成于结晶器内。文献资料[2]表明避免高微合金钢铸坯产生裂纹,就要降低其在结晶器中的传热,从而使初生坯壳薄而均匀。因此对结晶器内传热做相关有关优化,具体如下。

#### 2.2.1 结晶器冷却水量优化

为了避免形成粗大奥氏体晶粒,造成铸坯坯壳塑性降低,对结晶器的冷却强度进行了调整,降低冷却强度<sup>[3]</sup>,在确保铸坯坯壳出结晶器安全厚度的情况下实行“弱冷+均匀”的模式生产。

依据结晶器水流速计算公式及结晶器热流与坯壳厚度的经验公式

$$\text{水流速 } V = Q/S(\text{面积}) \quad (1)$$

$$\text{坯壳厚度 } E = 0.155H0.5 \quad (2)$$

$$\text{结晶器热流 } H = (Q/V) \times (a/p) \quad (3)$$

式中: $Q$ 表示结晶器水流量, $L \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $S$ (面积)表示结晶器水缝面积, $\text{m}^2$ ;式(3)中 $Q$ 表示结晶器冷却水量, $L \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $V$ 表示拉速, $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $a$ 表示结晶器进回水温差, $^{\circ}\text{C}$ ;  $p$ 表示结晶器周边厂, $\text{m}$ 。

计算出工艺优化前后结晶器水流速、坯壳厚度,如表3所示。

从表3可知,结晶器水量降低后水流速明显降低,但坯壳厚度仍在安全浇钢范围内,同时对比不同冷却工艺条件下铸坯裂纹程度,如表4所示。

晶器内传热,黏度控制铸坯在结晶器内均匀性和润滑性。一般来说,保护渣碱度越高,结晶器内保护渣渣膜结晶率越高,越能抑制铸坯传热;保护渣黏度越高,结晶器内保护渣润滑性越好,但均匀性相对变差。综上可知,为降低高微合金钢铸坯裂纹的发生率,宜采用高碱度、适中黏度的保护渣。本研究课题在相同工艺参数下相继实验多种保护渣,并统计对应的铸坯裂纹程度,如表5所示。

从表5可以看出,保护渣碱度提高有利于减轻铸坯裂纹程度,但黏度过高和过低均又恶化铸坯裂纹。

表5 不同保护渣对应铸坯裂纹程度

Table 5 Corresponding crack degree of slab with different mould fluxes

保护渣 厂商	保护渣主要理化指标				裂纹 程度
	碱度	黏度/ (Pa·s <sup>-1</sup> )	熔点/°C	铸坯检验 数量/块	
A厂	0.69	0.85	1 170	10	严重
B厂	0.94	0.63	1 162	10	较为严重
C厂	1.07	0.38	1 180	10	严重

### 2.2.3 拉速控制

为了提高铸机台时产量,该厂连铸机拉速均控制在2 m/min以上,甚至达到2.5 m/min,而连铸拉速提高亦带来其他问题。铸机拉速提高,保护渣消耗量就会相应的减少,保护渣消耗量是一个表征保护渣润滑性能的重要参数,它与渣膜厚度和坯壳与结晶器壁间的摩擦力有直接关系<sup>[5]</sup>。保护渣消耗量少时,无法很好的填充铸坯与结晶器壁间空隙,渣膜厚度变薄,润滑变差,坯壳与结晶器壁间的摩擦力

增大,容易造成黏结漏钢和其他形式裂纹。但高钒含铌钢铸坯表面温度过低易产生矫直裂纹,而拉速快慢直接影响铸坯表面温度。鉴于此,经实践摸索,该台铸机生产HRB600(E)钢合理拉速控制在(1.7~1.9) m/min。

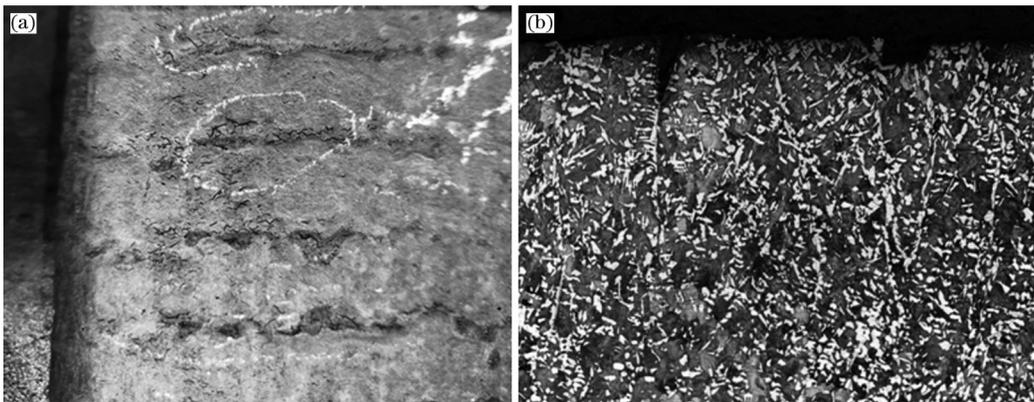
鉴于上述理论指导及生产经验,试生产5炉HRB600(E)钢,连铸生产工艺参数如表6所示。从检测结果来看,铸坯裂纹程度较工艺优化前有明显的减轻,但铸坯内弧面仍存在轻微的横向裂纹,取裂纹试样观察,裂纹大多沿铸坯振痕波谷处开裂,裂纹周围无脱碳,如图3(a)、(b)所示。

表6 试生产连铸工艺参数

Table 6 Process parameters for trial production of continuous casting

钢种	结晶器水量/ (L·min <sup>-1</sup> )	保护渣 厂商	拉速范围/ (m·min <sup>-1</sup> )	铸坯裂纹 程度
HRB600(E)	2 000	C厂	1.7~1.9	轻微

注:其他生产工艺参数按优化前执行。



(a) 铸坯裂纹宏观形貌; (b) 铸坯裂纹微观形貌。

图3 优化结晶器水量及保护渣后铸坯裂纹形貌

Fig.3 Crack morphology of slab after optimizing water content of mould and mould flux

## 2.3 二次冷却优化

鉴于结晶器水量和保护渣性能优化后,铸坯表面仍存在轻微裂纹,随即对铸机二次冷却进行优化。文献资料[6]表明铸坯出结晶器后,足辊和零段过强冷却,铸坯表面裂纹发生率呈增加的趋势。

### 2.3.1 二次冷却水量优化

基于上述的理论,在保证喷嘴有效冷却效果的前提下降低二冷比水量,经计算铸机二冷最低比水量为1.0 L/kg。

### 2.3.2 二冷分配比优化

二冷工艺优化前对铸机二次冷却温度场进行

模拟,发现二次冷却区铸坯表面回温较大(二冷回温差200 °C),主要体现在二冷1区冷却强,铸坯表面温度低,后期回温较大,如图4所示。随即对二冷分配比工艺进行了调整,如表7所示,结合优化后二冷比水量对铸坯冷却温度场进行模拟,发现二次冷却优化后铸坯表面回温差明显减少(二冷回温差80 °C),如图5所示。

## 2.4 优化效果

按照优化后工艺参数试生产了20炉HRB600(E)钢,并对铸坯表面进行批量检查发现铸坯表面无横向裂纹,且轧制轧材无翘皮、裂纹等质量问题,优化

后工艺参数如表8所示,优化后铸坯/轧材表面质量如图6(a)、(b)所示。

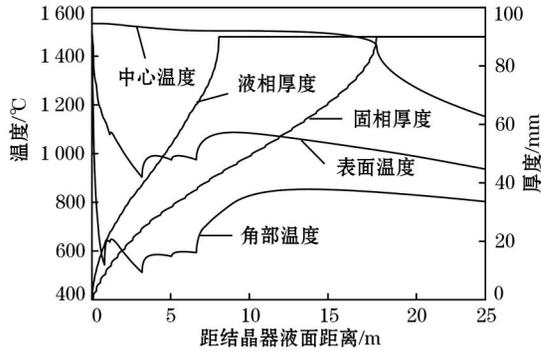


图4 二次冷却优化前温度场模拟图

Fig.4 Temperature field simulation before secondary cooling optimization

表7 二冷分配比优化前后数据对比

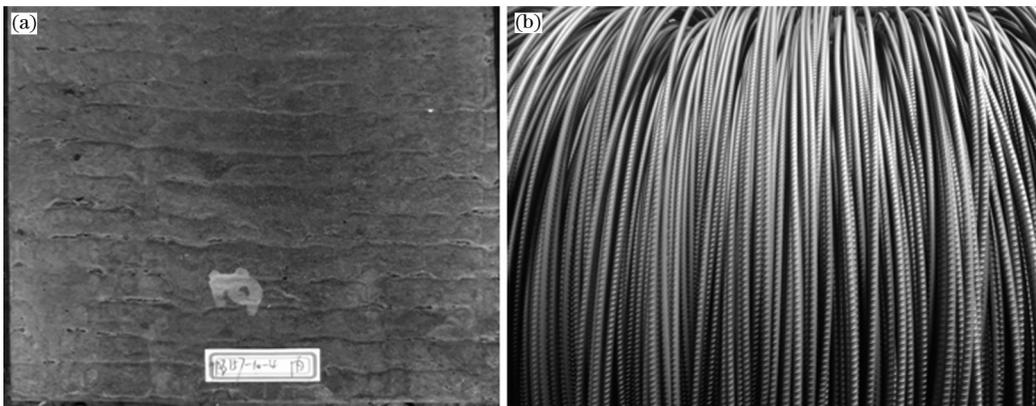
Table 7 Data comparison before and after optimization of secondary cooling distribution ratio

优化项	优化前参数	优化后参数
二冷分配比参数	22:48:19:11	36:34:19:11

表8 优化后工艺参数

Table 8 Optimized process parameters

优化项	结晶器冷却水量/(L·min <sup>-1</sup> )	二冷比水量/(L·min <sup>-1</sup> )	二冷分配比	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	保护渣理化指标		
					碱度	黏度/(Pa·s <sup>-1</sup> )	熔点/°C
数值	2 000	1	36:34:19:11	1.7~1.9	0.9~1.0	0.6~0.7	1 130~1 170



(a) 铸坯表面质量; (b) 轧材表面质量。

图6 工艺优化后铸坯/轧材表面质量

Fig.6 Surface quality of slab/roll after process optimization

(3) 优化工艺参数后,生产的15炉高强度HRB600(E)钢铸坯表面无横向裂纹,且对应的轧材无翘皮、裂纹等缺陷。

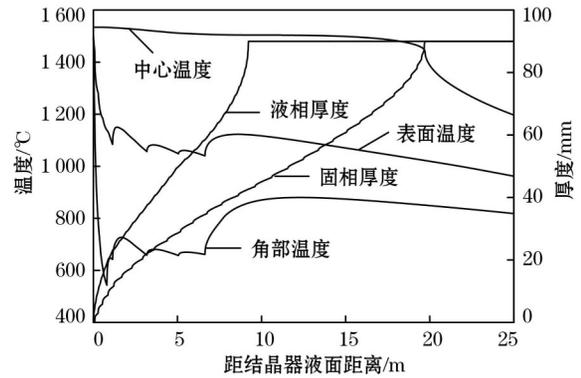


图5 二次冷却优化后温度场模拟图

Fig.5 Temperature field simulation after secondary cooling optimization

### 3 结论

(1) 高强度HRB600(E)钢铸坯表面横向裂纹主要是由于结晶器传热控制不当和二冷冷却不当造成。

(2) 控制结晶器传热重点在于:(a)结晶器冷却制度;(b)控制结晶器保护渣的碱度和黏度,一般采用高碱度、适中黏度保护渣浇铸。

#### 参考文献:

[1] 包石磊. 含Nb包晶钢连铸大圆坯表面横裂纹形成原因分析与对策[J]. 连铸, 2016, 41(2): 71.  
 [2] 简龙, 温铁光, 魏元, 等. X65管线钢铸坯角部横裂纹的成因及

- 控制措施[J].鞍钢技术,2010(4):50.
- [3] A Yamauchi, K Sorimachi, T Yamauchi. Effect of solidus temperature and crystalline phase of mould flux on heat transfer in continuous casting mould[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2002, 29(3):203.
- [4] 陈荣凯,刘坤.马标C12D钢方坯角裂漏钢控制实践研究[J].连铸,2018,43(6):74.
- [5] 苏瑞先,苏志坚.高碳工具钢板坯连铸生产工艺优化[J].连铸,2019,44(1):18.
- [6] 许少普.二冷配水优化对连铸坯质量改善的影响[J].连铸,2012(1):5.

## 《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于1954年,由中国科学技术协会主管,中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办,是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊,也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由53名国内知名学者、企业家等组成的编委会,编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员毛新平、谢建新等7位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际;坚持为中国钢铁工业生产建设服务,报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理经验 and 专业理论应用研究等,以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平,促进钢铁工业的发展。

2001年10月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》;名列双百第74名。2009年以前为EI收录期刊,自1992年开始,《钢铁》连续7次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊);为中信所“中国科技核心期刊”;被国际著名检索机构Scopus收录。

《钢铁》主要栏目有:综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢铁》现为月刊;大16开;页码为88页;期刊为自办发行。

### 1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

### 2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上,特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

### 3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条,进入期刊的首页了解详情。

联系人:尚海霞,党玉华,何 祺;

邮 箱:IS@chinamet.cn;

电 话:010-62182345;

传 真:010-62185134;

通讯地址:北京市海淀区学院南路76号;

邮 编:100081。